(مقالهٔ پژوهشی)

شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان آشفته در یک مجرای مربعی*

امین رسام [۱] زینب پورانصاری [۲] محمدرضا زنگنه [۳]

چکیده در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی گردابه‌های بزرگ جریان آشفته با استفاده از مدل زیرشبکهٔ اسماگورینسکی دینامیکی (DS) در یک مجرای مربعی در عدد رینولدز اصطکاکی Re_τ=۱۸۰ انجام و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مشخص شدن دقّت شبیه‌سازی با مدل DS، نتایج با داده‌های مرجع حاصل از شبیه‌سازی عددی به روش مستقیم مقایسه شده‌اند. همچنین، برای بررسی تأثیر مدل DS، یک شبیه‌سازی عددی بدون مدل زیرشبکه نیز انجام شده و نتایج آن با مدل DS مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش حجم محدود و با دقّت مرتبهٔ دوم، برای گسسته‌سازی معادلات ناویر-استوکس، انجام شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که نتایج مدل زیرشبکهٔ DS، در شبکهٔ مورد استفاده، مطابقت خوبی با داده‌های شبیه‌سازی مستقیم، برای کمّیت‌های سرعت متوسط و تنش‌های رینولدز، داشته و بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در نتایج شبیه‌سازی با مدل زیرشبکهٔ DS نسبت به شبیه‌سازی بدون مدل زیرشبکه مشاهده می‌گردد.

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ؛ مدل اسماگورینسکی دینامیکی؛ جریان آشفته؛ مجرای مربعی.

Large-Eddy Simulation of Turbulent Square Duct Flow

A. Rasam Z. Pouransari M. R. Zangeneh

Abstract *In this research, large-eddy simulation of a turbulent square duct flow is performed at the friction Reynolds number $Re_\tau = 180$, using the dynamic Samgorinsky (DS) subgrid-scale model and the results are discussed. To assess the accuracy of the DS model, the results are compared with the reference direct numerical simulation data. Moreover, to see the effect of the DS model, a numerical simulation without a subgrid-scale model is also performed and the results are compared with those of the DS model. Simulations are carried out using a second-order finite volume method for discretization of the Navier—Stokes equations. Results from the DS model simulations, for the grid used, are in good agreement with the direct numerical simulation data for the mean velocity and Reynolds stresses and an appreciable improvement is observed with respect to the no subgrid-scale model simulations.*

Key Words Large-Eddy Simulation, Dynamic Smagorinsky Model, Turbulent Flow, Square Duct

*تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۱۰/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۱/۲۹ می‌باشد. **DOI:**10.22067/fum-mech.v31i1.84947

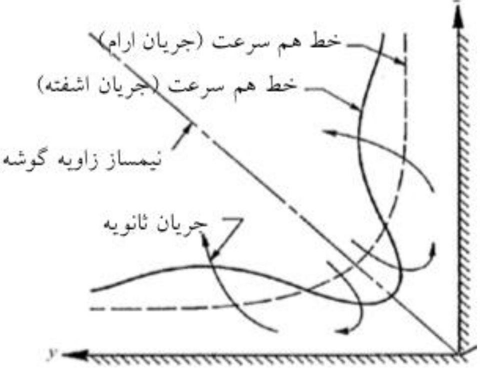
(۱) نویسندهٔ مسئول: استادیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهیدبهشتی. a_rasam@sbu.ac.ir

(۲) استادیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی.

مقدّمه

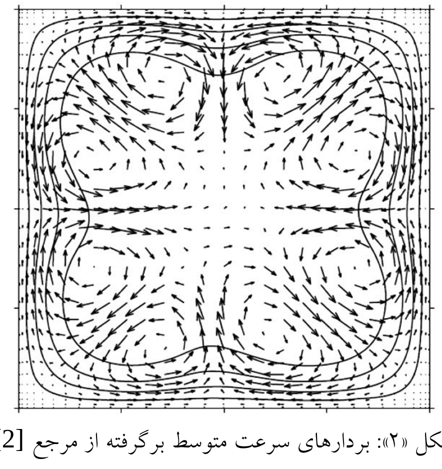
جریـــان آشـــفته در مجراهـــای چهـــارگوش دارای کاربردهای صنعتی متعدّدی است. از آن جمله می‌تـوان بـــه کـــاربرد در صـــنایع گرمایشـــی، تهویـــهٔ مطبـــوع، محفظه‌های احتـراق و سیسـتم‌هـای انتقـال آب اشـاره نمود. به‌علاوه، علی‌رغم سادگی نسبی هندسـی، وجـود جریان‌های ثانویّه باعث پیچیدگی فیزیکی این جریان‌ها می‌گردد. این جریان‌های ثانویّه که در اثـر آشـفتگی بـه وجود می‌آیند، باعث انتقال مومنتوم از مرکـز کانـال بـه گوشه‌هـای مجـرا و اخـتلاط جریـان مـی‌گردنـد. ایـن موضوع در شکل (۱) به‌روشنی دیده مـی‌شـود. در ایـن شکل خطوط هم‌سرعت برای جریان‌های آرام و آشـفته در گوشـهٔ یـک مجـرا نشـان داده شـده‌انـد. بـه دلیـل پیچیدگی این جریان‌ها، شبیه‌سازی عددی آن‌هـا، بـرای بررسی دقّـت مـدل‌هـای آشـفتگیماننـد شـبیه‌سـازی گردابه‌های بزرگ، حائز اهمّیّت است. همان‌طور کـه در شکل (۲) نشان داده شده است، این جریان‌هـای ثانویـهٔ آشفته در مقاطع عمود بر جهت جریان متوسط شامل ۸ گردابه در گوشه‌ها می‌باشند. این گردابه‌هـا دوبـه‌دو بـر خلاف جهت یکدیگر چرخیـده و نسـبت بـه قطرهـای مقطع مربعی مجرا متقارن می‌باشند [2, 3].



شکل «۱»: خطوط هم سرعت درگوشهٔ مجرا برگرفته از مرجع [1]

ازجمله مهـم‌تـرین مطالعـات در مـورد انـدرکنش جریـان‌هـای ثانویّـه، سـرعت متوسـط و سـرعت‌هـای نوسانی آشفتگی در مجراها می‌تـوان بـه پـژوهش‌هـای انجام شده توسط گسـنر [2] و گسـنر و جـونز [3]، بـا استفاده از داده‌های تجربـی اشـاره نمـود. بررسـی‌هـای انجام شده در این تحقیقات بـر روی معادلـه ورتیسـتی متوسط در راستای جریان اصـلی، نشـان مـی‌دهنـد کـه گرادیان‌های تنش برشی آشفتگی در راستای عمـود بـر نیمساز زاویه گوشه مجـرا، باعـث ایجـاد جریـان‌هـای ثانویّه، در جهت عمود بر جهت جریان متوسط اصـلی، به سمت گوشه‌ها می‌گردد. همان‌طور که در شـکل (۱) نیز نشان داده شده، این جریان‌های ثانویّه باعـث ایجـاد انحنای متفاوتی در خطوط هم سرعت در جریان آشفته نسبت به جریان آرام می‌گردد.

بررسی‌های عددی متعدّدی در مـورد جریـان‌هـای آشفته در مجـاری چهـارگوش انجـام‌شـده اسـت. ایـن شبیه‌سازی‌ها را می‌توان با توجّه به روش به‌کاررفتـه بـه سه دستهٔ: شـبیه‌سـازی مسـتقیم [1, 4-7]، شـبیه‌سـازی گردابه‌های بزرگ جریان [8, 9] و شبیه‌سازی بـه روش معادلات متوسـط‌گیـری شـدهٔ رینولـدز تقسـیم نمـود. نمونه‌هایی از مطالعات انجام شده بـا اسـتفاده از روش شبیه‌سازی مستقیم و شـبیه‌سـازی گردابـه‌هـای بـزرگ جریان در ادامه به‌اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل «۲»: بردارهای سرعت متوسط برگرفته از مرجع [2]

از میان مطالعات انجام شده بـه روش شـبیه‌سـازی مستقیم، می‌توان به بررسی‌های انجام شده توسط ژنـگ و همکـاران [7] در اعـداد رینولـدز اصـطکاکی، ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰ و ۱۲۰۰ اشاره نمود. در ایـن تحقیـق، تـأثیر عدد رینولدز بر دینامیـک جریـان مـورد بررسـی قـرار گرفته است. وینوئسا و همکاران [1] بـه بررسـی تـأثیر نسـبت ابعـاد مجـرا بـر روی گردابـه‌هـای ثانویّـه در مجراهای مستطیلی در اعداد رینولدز اصطکاکی ۱۸۰ و ۳۳۰ پرداخته‌اند. هوسر و برینگن [4] جریان آشـفته در یک کانال مربعی در عـدد رینولـدز اصـطکاکی ۶۰۰ را مورد بررسی قرار دادند. از مهم‌ترین یافتـه‌هـای ایشـان می‌توان به برقـراری ارتبـاط بـین ناهمسـانگردی تـنش رینولدز در گوشه‌ها با ساختارهای جریان آشفته اشـاره کرد. پینلی و همکاران [5] نقش ساختارهای جریان در شکل‌گیری جریان‌های ثانویّه را با استفاده از شبیه‌سازی عددی به روش مستقیم در یک مجـرای مربعـی مـورد بررسی قرار دادند. از میان مطالعات انجام شده به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نیـز مـی‌تـوان بـه تحقیـق انجام شده به‌وسیله زو و پولارد [9] با اسـتفاده از مـدل زیرشبکهٔ اسماگورینسکی اشاره کـرد. نتـایج حاصـل از این شبیه‌سازی‌ها در عـدد رینولـدز اصـطکاکی ۲۰۰ در یـک مجـرای مربعـی تطـابق مناسـبی بـا نتـایج شبیه‌سازی‌های مستقیم نشان می‌دهد.

با توجّه به انـدازه سـاختارهای آشـفتهٔ موجـود در جریان داخل مجرا، در نظر گرفتن یک دامنهٔ محاسـباتی بزرگ برای شبیه‌سازی‌های عددی ضـروری اسـت. بـه همین دلیل، شبیه‌سازی این نوع جریان‌ها به روش‌هـای مستقیم و گردابه‌های بزرگ ازنظـر محاسـباتی پرهزینـه است. به‌تبع آن، در مقایسه با دیگر جریان‌هـای آشـفته، شبیه‌سازی‌های عددی کمتری در این مورد وجود داشته و نیازمند بررسی‌های بیش‌تری است.

در این تحقیق، از روش شـبیه‌سـازی گردابـه‌هـای بزرگ جریان برای شـبیه‌سـازی عـددی جریـان آشـفته داخل یک مجرای مربعی بـا عـدد رینولـدز اصـطکاکی $Re_\tau = ۱۸۰$ با استفاده از مدل زیرشبکهٔ اسماگورینسکی دینامیکی پرداخته مـی‌شـود. عـدد رینولـدز اصـطکاکی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re_\tau = \frac{hu_\tau}{\upsilon} = ۱۸۰, \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_{دیوار}}{\rho}}. \qquad (۱)$$

در ایـــن روابـــط، h نصـــف ارتفـــاع مجـــرا، υ ویسکوزیتهٔ سینماتیکی سیال، ρ چگالی سـیال و $\tau_{دیوار}$ تنش برشی بر روی دیوارهٔ مجرا است. به‌منظور بررسی اثر مدل زیرشبکه، یک شبیه‌سازی عددی بدون مدل نیز انجام و نتایج حاصل از آن‌ها بـا یکـدیگر و هـم‌چنـین داده‌های شبیه‌سازی مستقیم مرجع [1] مقایسه می‌شوند.

معادلات حاکم و مدل زیرشبکه

معادلات حاکم بر گردابه‌های بزرگ جریـان، در حالـت تراکم‌ناپذیر، با اعمال فیلتر بر معادلات ناویر- اسـتوکس غیرقابل تراکم و معادلهٔ پیوسـتگی بـه‌صـورت زیـر بـه دست می‌آیند [10]:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i, \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1,2,3. \qquad (۳)$$

در ایـــن معـــادلات، از قاعـــده جمـــع بـــر روی اندیس‌های تکراری استفاده شده، $\tilde{\ }$ نشـان‌دهنـده یـک کمّیت فیلتر شده، $\tilde{u}_i$ بردار سـرعت، $\tilde{p}$ فشـار، F_i بـردار نیروی حجمی و τ_{ij} تانسور تنش زیرشـبکه اسـت کـه به‌صورت زیر تعریف می‌شود [10]:

$$\tau_{ij} = \widetilde{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \qquad (٤)$$

این تنش‌ها ناشی از مقیاس‌های زیر شبکه بوده و نیازمند مدسازی می‌باشند. از مدل اسماگورینسکی دینامیکی [11] با اصلاحات لی‌لی [12] برای مدل‌سازی τ_{ij} در معادلات حاکم بر گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. این مدل به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\tau_{ij}-\frac{2}{3}K^{SGS}\delta_{ij}=-2\upsilon_T\tilde{S}_{ij},\upsilon_T=C\tilde{\Delta}|\tilde{S}| \quad (۵)$$

$$\tilde{S}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i}\right), \quad |\tilde{S}|=\sqrt{2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}}. \quad (۶)$$

در این روابط υ_T ویسکوزیته گردابه‌ای، δ_{ij} دلتای کرونکر، K^{SGS} انرژی جنبشی آشفتگی زیرشبکه، $\tilde{\Delta}=2\sqrt[3]{\Omega}$ (Ω حجم یک سلول محاسباتی است)، $\tilde{S}_{ij}$ تانسور نرخ کرنش و C ضریب اسماگورینسکی است، که به‌صورت دینامیکی محاسبه می‌شود.

روش حل عددی، دامنهٔ حل و شبکه‌بندی

شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز code Saturne نسخهٔ ۵ [13] به روش حجم محدود هم‌مکان انجام گرفته است. در این روش، شکل پایستار معادلات ناویر- استوکس با استفاده از روش مرکزی با دقّت مرتبهٔ دو گسسته‌سازی و از روش مرتبهٔ دوم کرنک-نیکولسون نیز برای گسسته‌سازی زمانی استفاده شده است.

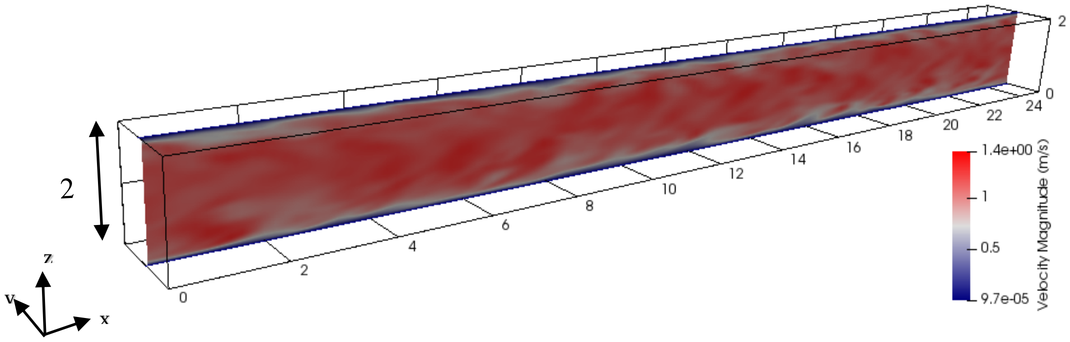
از الگوریتم SIMPLEC برای وابستگی معادلات سرعت-فشار و میانیانی Rhie-Chow به‌منظور جلوگیری از نوسانات استفاده شده است. صحت عملکرد نرم‌افزار به‌کاررفته در این تحقیق، برای انجام شبیه‌سازی به روش گردابه‌های بزرگ، توسط رسام و همکاران [14,15] مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصّات شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده و همچنین شبیه‌سازی مستقیم مرجع [1] در جدول (۱) آمده است.

جدول «۱»: مشخصّات شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده، شامل فاصلهٔ نقاط شبکه و عدد رینولدز اصطکاکی. شبیه‌سازی مستقیم مربوط به مرجع [1] است.

شبیه‌سازی	مدل	Δx^+	Δy^+	Δz^+	Re_τ
DS-SGS	DS	۳۵	۹	۹	۱۴۲/۱
No-SGS	--	۲۸	۱۱	۱۱	۱۵۴/۸
DNS	--	۱۰	۵	۹	۱۴۸/۳

اندازهٔ دامنهٔ حل در جهت جریان، با توجّه به ساختارهای جریان آشفته در این جهت تعیین می‌گردد. برای شبیه‌سازی مناسب گردابه‌های بزرگ، دامنهٔ حل در این شبیه‌سازی‌ها 25h در نظر گرفته شده است. اندازهٔ مجرای مربعی در دو جهت دیگر نیز 2h است. شایان یادآوری است که دامنهٔ حل مشابه دامنهٔ حل در مرجع [1] است. دامنهٔ حل، به همراه کانتور سرعت آنی در یک مقطع x-z در مجرای مورد نظر در شکل (۳) نشان داده شده است. شرط مرزی روی دیواره‌های مجرا، عدم لغزش و شرط مرزی در ورودی و خروجی، تناوبی در نظر گرفته شده است؛ بنابراین جریان متوسط در راستای x کاملاً توسعه‌یافته خواهد بود. برای برقراری جریان، نیروی حجمی F_i در معادلهٔ (۲)، در هر گام زمانی از شبیه‌سازی به‌گونه‌ای محاسبه می‌شود که دبی حجمی ورودی مقدار ثابتی باشد. لذا، شبیه‌سازی‌های عددی با سرعت میانگین ورودی ثابت انجام شده و عدد رینولدز، برمبنای سرعت میانگین ورودی (U_b)، $Re_b=U_bh/\nu=۲۵۰۰$ و مطابق با شبیه‌سازی مستقیم مرجع [1] است.

شبکهٔ محاسباتی در جهت جریان یکنواخت بوده و توزیع نقاط شبکه در دو جهت دیگر، به‌صورت تابع تانژانت هذلولوی است [16]. فواصل نقاط شبکه در جدول (۱) در مقیاس‌های دیواره داده شده‌اند. این مقیاس‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:



شکل «۳»: شماتیکی از دامنهٔ حل به همراه کانتورهای اندازه سرعت لحظه‌ای در مقطع میانی مجرا برای شبیه‌سازی DS-SGS

$$\Delta x^+ = \frac{u_\tau^* \Delta x}{\nu}, \qquad \Delta y^+ = \frac{u_\tau^* \Delta y}{\nu}, \qquad \Delta z^+ = \frac{u_\tau^* \Delta z}{\nu}, \qquad u_\tau^* = \langle \sqrt{\frac{\tau_{\text{دیوار}}}{\rho}} \rangle \quad (٦)$$

$$\Delta x^+ = \frac{u_\tau^* \Delta x}{\nu}, \qquad \Delta y^+ = \frac{u_\tau^* \Delta y}{\nu}, \qquad \Delta z^+ = \frac{u_\tau^* \Delta z}{\nu}, \qquad u_\tau^* = \langle \sqrt{\frac{\tau_{\text{دیوار}}}{\rho}} \rangle \quad (٧)$$

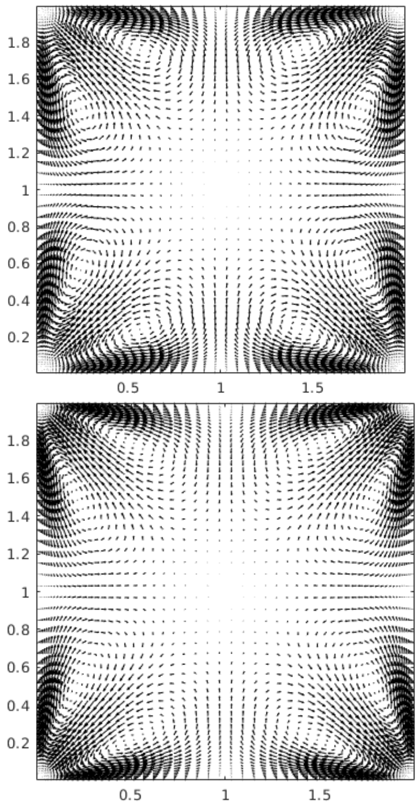
در این روابط، u_τ^* سرعت اصطکاکی متوسط‌گیری شده روی تمام دیواره‌ها است. مقادیر Δx^+، Δy^+ و Δz^+ متناسب با مقادیر توصیه‌شده در مرجع [17] در نظر گرفته شده است.

بردارهای سرعت

بردارهای سرعت متوسط برای یک مقطع عمود بر جهت جریان (y-z) در شکل (٤) نمایش داده‌شده‌اند. شکل‌ها ساختارهای جریان در این مقطع را نشان می‌دهند. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، ٨ گردابه در گوشه‌های مجرای مربعی دیده می‌شود که کاملاً متقارن می‌باشند.

گردابه‌های بردارهای سرعت در دو شبیه‌سازی متشابه بوده و تنها اختلافات جزئی بین نتایج دو شبیه‌سازی مشاهده می‌گردد.

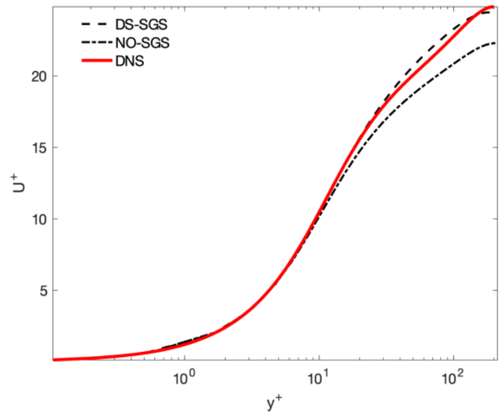
تقارن موجود در شکل‌ها و شباهت با نتایج شبیه‌سازی مستقیم مرجع، صحت شبیه‌سازی‌ها و کافی بودن مدّت زمان متوسط‌گیری‌ها را برای سرعت متوسط نشان می‌دهد.



شکل «٤»: بردارهای سرعت متوسط در یک مقطع y-z برای شبیه‌سازی DS-SGS (بالا) و شبیه‌سازی No-SGS (پائین).

سرعت متوسط

پروفیل‌های سرعت متوسط در راستای x به‌صورت زیر محاسبه و در مقیاس دیواره در مرکز مجرا در شکل (٥) نشان داده شده‌اند.



شکل «۵»: پروفیل‌های سرعت متوسط $\mathbf{U^+}$ بر حسب $\mathbf{y^+}$ در مقیاس دیواره در مرکز مجرا. داده‌های DNS برگرفته از مرجع [2] است.

$$U^+ = \frac{\langle u\rangle}{u_\tau^*},\ \langle u\rangle = \frac{1}{T}\langle\int_0^T u(x,y,z,t)dt\rangle_x \qquad (۸)$$

در روابط بالا، T بیان‌گر مدّت زمان متوسط‌گیری است. همان‌طور که در رابطهٔ (۸) نشان داده شده، تمام کمّیت‌های متوسط‌گیری شده، هم در زمان و هم در راستای x که جریان آشفته در آن راستا همگن آماری است، متوسط‌گیری شده‌اند [18]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت متوسط برای شبیه‌سازی DS-SGS که از مدل DS استفاده می‌کند، با نتایج شبیه‌سازی مرجع در تمام نقاط مطابقت بسیار خوبی دارد؛ اما در شبیه‌سازی No-SGS پروفیل سرعت در لایهٔ میانی و ناحیه قانون لگاریتمی کم‌تر از مقدار شبیه‌سازی مرجع است. این اختلاف، ناشی از پیش‌بینی بیش‌تر از مقدار واقعی تنش برشی دیواره، $\tau_{\text{دیوار}}$ است. این موضوع در پیش‌بینی‌های مربوط به مقادیر Re_τ در جدول (۱) نیز مشهود است. بزرگ بودن تنش برشی دیواره نیز نشان می‌دهد که آشفتگی جریان در شبیه‌سازی‌های عددی No-SGS بیشتر از مقدار شبیه‌سازی مرجع است. ازآنجایی‌که نقش مدل زیر شبکه حذف بخشی از انرژی جنبشی آشفتگی (مربوط به مقیاس‌های زیرشبکه) است [18]، بیش‌تر بودن آشفتگی در شبیه‌سازی‌های No-SGS ناشی از نبود مدل زیرشبکه است چراکه وظیفهٔ مدل زیرشبکه، مدل‌سازی مناسب اثر گردابه‌های کوچک بر جریان است که بر اساس نظریهٔ آبشار انرژی، انرژی جنبشی آشفتگی را مستهلک می‌کنند.

تنش‌های رینولدز

شکل (٦) تنش‌های متوسط رینولدز را در مختصات دیواره نشان می‌دهد. این تنش‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

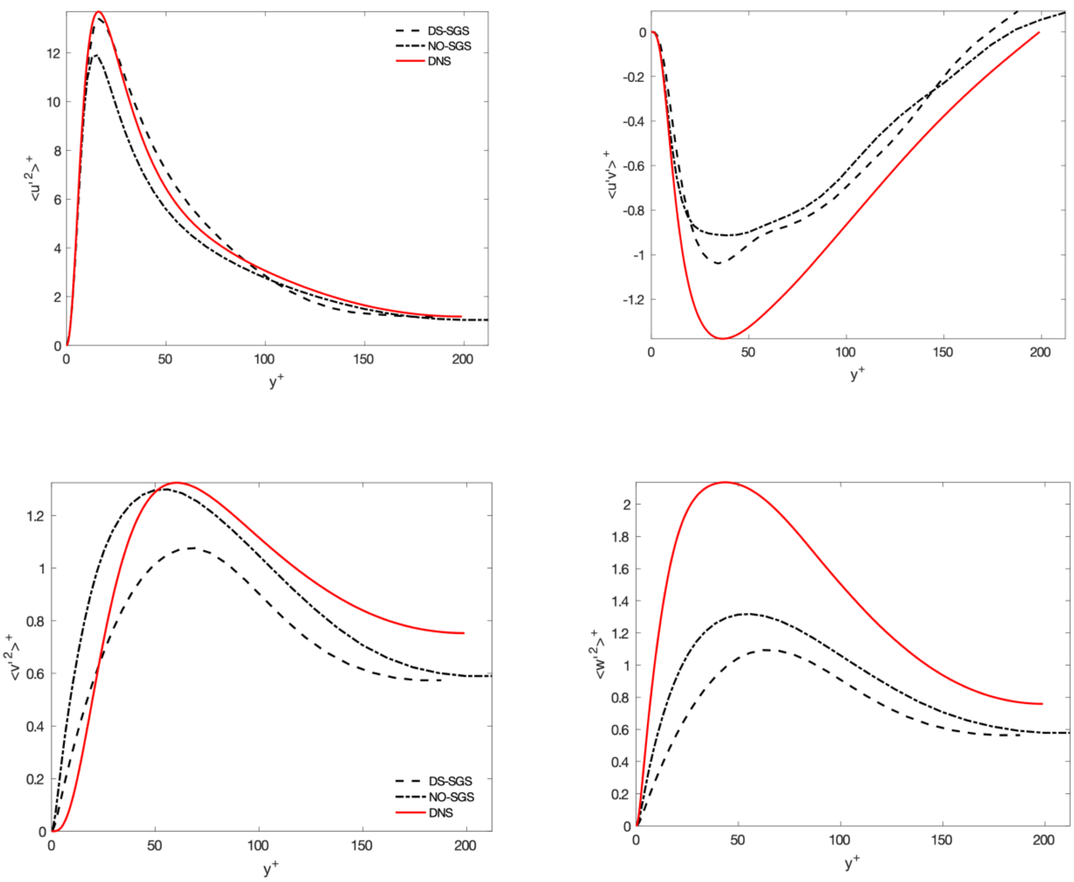
$$\begin{aligned}
\langle u'u'\rangle^+ &= \frac{\langle u'u'\rangle}{u_\tau^{*2}} = \langle u^2\rangle^+ - \langle u\rangle^{2+}\\
\langle v'v'\rangle^+ &= \frac{\langle v'v'\rangle}{u_\tau^{*2}} = \langle v^2\rangle^+ - \langle v\rangle^{2+}\\
\langle w'w'\rangle^+ &= \frac{\langle w'w'\rangle}{u_\tau^{*2}} = \langle w^2\rangle^+ - \langle w\rangle^{2+}\\
\langle u'v'\rangle^+ &= \frac{\langle u'v'\rangle}{u_\tau^{*2}} = \langle uv\rangle^+ - \langle u\rangle^+\langle v\rangle^+
\end{aligned} \qquad (۹)$$

در این روابط، (u,v,w) مؤلفه‌های سرعت می‌باشند. مؤلفه نرمال تنش رینولدز در جهت جریان در مختصات دیواره، $< u'u' >^+$ به‌درستی در شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل زیرشبکهٔ DS پیش‌بینی شده است. درحالی‌که در شبیه‌سازی بدون مدل زیرشبکه، نتیجه بسیار کم‌تر از مقدار پیش‌بینی شده در شبیه‌سازی مرجع است. این اختلاف نیز به دلیل عدم وجود استهلاک مربوط به مدل زیرشبکه بوده که باعث شده تا در مختصات دیواره این اختلاف به وجود بیاید. شایان‌ذکر است که این رویه برخلاف آن چیزی است که در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان در کانال‌ها دیده می‌شود [17]. همچنین، محل بیشینهٔ $< u'u' >^+$ در شبیه‌سازی DS-SGS مشابه نتیجهٔ شبیه‌سازی مرجع و در $y^+ = yu_\tau^*/\upsilon \approx ۱۹$ است، درحالی‌که در شبیه‌سازی No-SGS محل بیشینه تنش در y^+ کوچک‌تری قرار دارد. این موضوع نشان‌دهنده کوچک‌تر بودن مقیاس‌های جریان در نزدیکی دیواره،

به‌خاطر آشفتگی بیش‌تر جریان است. سایر تنش‌های نرمال ($< v'v' >^+$ و $< w'w' >^+$) در شبیه‌سازی عددی No-SGS مطابقت بهتری نسبت به DS-SGS با نتایج مرجع دارند؛ اما در ناحیهٔ نزدیک دیواره، هیچ‌کدام از شبیه‌سازی‌ها پیش‌بینی درستی از رفتار این تنش‌ها ندارند. این اختلاف در دقّت پیش‌بینی مؤلفه‌های کوچک‌تر تنش‌های نرمال رینولدز به‌وسیله مدل زیرشبکه، درحالی‌که مؤلفه $< u'u' >^+$ با دقّت مناسبی پیش‌بینی شده است، نشان‌دهنده مدل‌سازی نادرست ویسکوزیته گردابه‌ای در معادلهٔ (۵) است.

شایان یادآوری است که علّت این نادرستی مدل‌سازی ویسکوزیته گردابه‌ای به‌صورت یک کمّیت اسکالر و به‌صورت همسانگرد (مقدار یکسان برای تمام مؤلفه‌های تنش زیرشبکه) است.

تنش برشی رینولدز در شبیه‌سازی No-SGS، مطابقت نسبتاً بهتری با نتایج شبیه‌سازی مرجع دارد. نبود استهلاک انرژی زیرشبکه در این شبیه‌سازی باعث بیشتر شدن آشفتگی جریان و افزایش این مؤلفه تنش نسبت به شبیه‌سازی DS-SGS است.



شکل «۶»: پروفیل‌های تنش متوسط رینولدز $\langle u'^2\rangle^+$ ، $\langle v'^2\rangle^+$، $\langle w'^2\rangle^+$ و $\langle u'v'\rangle^+$ برحسب y^+. داده‌های DNS برگرفته از مرجع [2] است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان آشفته در داخل مجرایی مربعی با استفاده از روش حجم محدود انجام شد. شبیه‌سازی‌ها، یک مرتبه با استفاده از مدل زیرشبکهٔ اسماگورینسکی دینامیکی و یک مرتبه بدون استفاده از مدل زیرشبکه انجام شد تا اثر مدل زیرشبکه در شبیه‌سازی‌ها مشخص گردد. در ضمن، با مقایسه نتایج حاصل از این دو شبیه‌سازی با نتایج حاصل از یک شبیه‌سازی عددی مستقیم، دقّت نتایج شبیه‌سازی‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

از بررسی نتایج مشخص شد که در شبیه‌سازی بدون مدل، آشفتگی جریان و درنتیجه تنش برشی دیواره بیشتر است. این موضوع باعث شد تا کمّیت‌های سرعت متوسط و تنش $< u'u' >^+$ در مختصات دیواره نسبت به نتایج شبیه‌سازی مرجع کوچک‌تر باشند.

برخلاف نتایج شبیه‌سازی بدون مدل، شبیه‌سازی عددی با مدل اسماگورینسکی دینامیکی، مطابقت خوبی با نتایج شبیه‌سازی مرجع برای کمّیت‌های سرعت متوسط و تنش $< u'u' >^+$ داشت. نتایج در مورد سایر تنش‌های نرمال درست برعکس بود و شبیه‌سازی بدون مدل عملکرد بهتری داشت.

تنش‌های نرمال $< v'v' >^+$ و $< w'w' >^+$ به‌دست‌آمده از هر دو شبیه‌سازی در ناحیه نزدیک دیواره رفتار مجانبی نادرستی داشتند. بهبود در پیش‌بینی تنش برشی $< u'v' >$ نیز که نقش بسیار مهمی در تولید انرژی جنبشی آشفتگی در جریان دارد، در شبیه‌سازی با مدل اسماگورینسکی دینامیکی نسبت به شبیه‌سازی بدون مدل مقدار قابل‌ملاحظه‌ای نبود. با توجّه به پیچیدگی جریان داخل مجاری چهارگوش، به نظر می‌رسد که تحقیقات بیش‌تری برای مدل‌سازی مناسب این نوع از جریان‌ها مورد نیاز باشد.

تقدیر و سپاس‌گزاری

از پشتیبانی و در اختیار گذاشتن منابع مرکز محاسباتی پیشرفتهٔ دانشگاه شهید بهشتی ایران در این پروژه صمیمانه قدردانی می‌شود.

واژه‌نامه

روش حجم محدود هم‌مکان	Collocated finite volume method
همگن آماری	Statistically homogeneous
لایه میانی	Buffer layer
ناحیه قانون لگاریتمی	Log-law region
شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ	Large-Eddy Simulation (LES)
شبیه‌سازی مستقیم	Direct Numerical Simulation (DNS)
زیرشبکه	Subgrid-scale
رینولدز اصطکاکی	Friction Reynolds number
ناهمسانگردی	Anisotropy
متن باز	Open source
مقیاس دیواره	Wall units

مراجع

1. Vinuesa, R., Noorani, A., Lozano-Durán, A., Khoury, G.K.E., Schlatter, P., Fischer, P.F. and Nagib, H.M., "Aspect ratio effects in turbulent duct flows studied through direct numerical simulation", *Journal of Turbulence*, 15(10), pp. 677-706, (2014).
2. Gessner, F., "The origin of secondary flow in turbulent flow along a corner", *Journal of Fluid Mechanics*, 58(1), pp. 1-25, (1973).
3. Gessner, F. and Jones, J., "On some aspects of fully-developed turbulent flow in rectangular channels", *Journal of Fluid Mechanics*, 23(4), pp. 689-713, (1965).
4. Huser, A. and Biringen, S., "Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct", *Journal of Fluid Mechanics*, 257, pp. 65-95, (1993).
5. Pinelli, A., Uhlmann, M., Sekimoto, A. and Kawahara, G., "Reynolds number dependence of mean flow structure in square duct turbulence", *Journal of Fluid Mechanics*, 644, pp. 107-122, (2010).
6. Pirozzoli, S., Modesti, D., Orlandi, P. and Grasso, F., "Turbulence and secondary motions in square duct flow", *Journal of Fluid Mechanics*, 840, pp. 631-655, (2018).
7. Zhang, H., Trias, F.X., Gorobets, A., Tan, Y. and Oliva, A., "Direct numerical simulation of a fully developed turbulent square duct flow up to Re_τ= 1200", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 54, pp. 258-267, (2015).
8. Hebrard, J., Métais, O. and Salinas-Vasquez, M., "Large-eddy simulation of turbulent duct flow: heating and curvature effects", *International Journal of Heat and Fluid Flow,* 25(4), pp. 569-580, (2004).
9. Xu, H. and Pollard, A., "Large eddy simulation of turbulent flow in a square annular duct", *Physics of Fluids*, 13(11): pp. 3321-3337, (2001).
10. Sagaut, P., "*Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction*", Springer Science & Business Media, (2006).
11. Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model", *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3(7), pp. 1760-1765, (1991).
12. Lilly, D.K., "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method", *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(3), pp. 633-635, (1992).
13. Archambeau, F., Méchitoua, N. and Sakiz, M., "Code Saturne: A finite volume code for the computation of turbulent incompressible flows-Industrial applications", *Journal of Finite Volumes*, 1(1): pp. 1-62, (2004).
14. Rasam, A., Wallin, S., Brethouwer, G. and Johansson, A.V., "Large eddy simulation of channel flow with and without periodic constrictions using the explicit algebraic subgrid-scale model", *Journal of Turbulence*, 15(11), pp. 752-775, (2014).
15. Rasam, A., Wallin, S., Brethouwer, G. and Johansson, A.V., "Improving separated-flow predictions using an anisotropy-capturing subgrid-scale model", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 65, pp. 246-251, (2017).
16. Hoffmann, K.A. and Chiang, S.T., "*Computational fluid Dynamics*", Vol. I, Engineering Education System, (2000).

17. Rasam, A., Brethouwer, G., Schlatter, P., Li, Q. and Johansson, A.V., "Effects of modelling, resolution and anisotropy of subgrid-scales on large eddy simulations of channel flow", *Journal of Turbulence*, (12): pp. N10, (2011).
18. Pope, S.B., "*Turbulent flows*", IOP Publishing, (2001).